

Определение состава объекта по его гиперспектральному изображению

А.В. Демин^{1,2}, Е.Н. Сечак^{1,2}, С.П. Присяжнюк^{1,3}

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49,

² Акционерное общество «ЛОМО», 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Чугунная, д. 20,

³ Закрытое акционерное общество «Институт телекоммуникаций», 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 5

Аннотация

В статье приведены результаты исследований и разработки гипервидеоспектрометра скважинного флюида в реальных условиях эксплуатации и спектральном диапазоне от 0,35 мкм до 2,1 мкм. Разработана математическая модель и алгоритм идентификации скважинного флюида по составу и процентному содержанию по результатам анализа гиперспектрального изображения.

Ключевые слова: компьютерная оптика, обработка изображений, анализ изображений, обработка трехмерных изображений, спектрометр.

Цитирование: Демин, А.В. Определение состава объекта по его гиперспектральному изображению / А.В. Демин, Е.Н. Сечак, С.П. Присяжнюк // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 394-398. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-697.

Citation: Demin AV, Sechak EN, Prisyazhnyuk SP. Determining the composition of an object based on its hyperspectral image. Computer Optics 2021; 45(3): 394-398. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-697.

Введение

В настоящее время гиперспектральная съемка является одним из важнейших направлений развития средств космического, авиационного и наземного наблюдения. Результаты аэрокосмической и наземной гиперспектральной съемки в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах спектра электромагнитного излучения используются для решения в реальном масштабе времени задач: дистанционного зондирования поверхности Земли, контроля загрязнений окружающей среды, картографии, геологоразведки, метеорологии, океанографии, анализа скважинного флюида, биологии и др. [1–11].

Существенное преимущество гипервидеоспектрометров (ГВС) по отношению к другим спектрометрам заключается в возможности получения пространственно-спектрального распределения яркости регистрируемого излучения в виде пространственно-спектральной сигнатуры в 3D-формате («гиперкуб»). При этом основным преимуществом ГВС является не ширина анализируемого спектрального диапазона, а непрерывность регистрируемой спектральной картины с высоким показателем $\lambda/\Delta\lambda$ [9].

Следует отметить, что алгоритмы анализа гиперспектрального изображения (ГИ) зависят от исходной модели объекта (излучающий, отражающий и пропускающий излучение). Так, например, алгоритмы анализа ГИ на предмет идентификации компонентов исследуемого объекта, получаемые в ходе дистанционного зондирования поверхности Земли и исследования количественного состава скважинного флюида (совокупность углеводородов, воды, газа и компонен-

тов породы скважины) в реальном масштабе времени, принципиально разные. Разработке алгоритма определения компонентного состава скважинного флюида в реальном масштабе времени гипервидеоспектрометром и посвящена настоящая статья.

1. Принцип действия гипервидеоспектрометра

На рис. 1 показан принцип действия ГВС в общем случае, где приняты следующие обозначения: L_0 – объектив; U, V – плоскость разложения света в спектр (дифракционная решётка; диспергирующая призма), L_1 – объектив, ξ, η – плоскость пространственной фильтрации (пространственный фильтр; фотоприёмная линейка или матрица); L_2 – объектив; X', Y' – плоскость изображения; f – фокальные отрезки; λ – длина волны излучения.

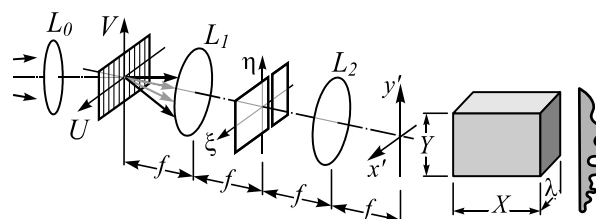


Рис. 1. Принцип действия гипервидеоспектрометра

При регистрации излучения на линейный фотоприёмник линейку (ФПЛ) в зависимости от способа пространственной фильтрации величина сигнала определяется формулами (1) [9, 12], где приняты следующие обозначения: $F(p)$ – сигнал после фильтра; $s(\lambda)$ – спектральная чувствительность ФПЛ; $f(\lambda)$ – спектральное распределение интенсивности; p – толщина среды; $\alpha(\lambda)$ – спектральный коэффициент по-

глощения среды; $A(x, y)$ – изображение; $\tau(\lambda, x)$ – коэффициент пропускания дифракционной решетки (нулевой порядок); $\eta(\lambda)$ – спектральная чувствительность ФПЛ; $s(\lambda, x, y)$ – гиперспектральное изображение; λ_1, λ_2 – границы спектрального интервала, в котором исследуется объект.

$$\left. \begin{aligned} F(p) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)p] \cdot s(\lambda) d\lambda \\ A(x, y) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, x) \cdot \eta(\lambda) \cdot s(\lambda, x, y) d\lambda \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

2. Постановка задачи

Следует отметить, что сложности применения ГВС связаны с обработкой и интерпретацией больших потоков информации, содержащейся в «гиперкубе», особенно при исследовании динамических сцен и определении поэлементного и химического состава, поскольку «гиперкуб» отображает суперпозицию спектров (см. рис. 2).

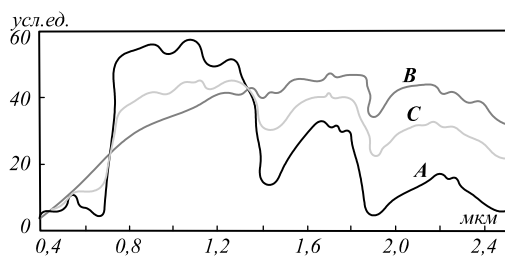


Рис. 2. Регистрация в ГВС чистых спектров A (сухая почва) и B (зелёная растительность) в виде их суперпозиций C

В этой связи эффективный анализ ГИ возможен за счет разработки алгоритма и математической модели анализа данных и применения высокопроизводительных программно-аппаратных комплексов. К наиболее распространённым следует отнести: ПО ERDAS, ENVI, THOR, EXPRESSO 13 и Spectronon [13].

Трудности распознавания структуры и покомпонентный состав объекта путем анализа его ГИ заключаются в том, что это большой объём анализируемой информации при отсутствии полной базы данных о спектральных характеристиках искоемых компонентов, а также в том, что исходные модели разные, так как в основе их лежат законы отражения, поглощения и излучения [15–19].

Одной из важных задач в нефтегазодобывающей отрасли является анализ в реальном моменте времени скважинного флюида, компонентами которого являются смесь углеводородов преимущественно метанового ряда (C_nH_{2n+2}), воды, газа и ароматического ряда (C_nH_{2n-6}). Исследования скважин и пластов в реальном масштабе времени проводятся с целью получения информации об объекте разработки, об условиях и интенсивности притока в скважину флюида, а также перспективности эксплуатации скважины [8].

3. Алгоритм определения состава скважинного флюида

Рассмотрим задачу анализа состава скважинного флюида по результатам построения гиперспектрального изображения компонентов нефти в скважине.

В соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера оптическая плотность скважинного флюида определяется соотношением 2, где приняты следующие обозначения: $D_{фл}$ – оптическая плотность скважинного флюида; k_λ – коэффициент поглощения света флюидом, зависящий от длины волны, химической природы и состояния флюида; k – безразмерный коэффициент поглощения; l – толщина исследуемого слоя флюида; C – концентрация компонентов нефти во флюиде; ε – коэффициент молярного погашения (экстинкция); I_0 и $I(l)$ – интенсивность облучающего и прошедшего через скважинный флюид света.

$$\begin{aligned} D_{фл} &= \lg \frac{I(l)}{I_0} = 0,43429 \{k_\lambda \cdot l\} = \\ &= 0,43429 \{4\pi k \cdot \lambda^{-1} \cdot l\} = \varepsilon \cdot l \cdot C. \end{aligned} \quad (2)$$

Спектр пропускания как суперпозиция спектральных «подписей» компонентов флюида характеризуется набором координат $\{\tau_i, \lambda_i, x_i\}_{i=1}^n$ (τ_i, λ_i и x_i – пропускание, спектральная «подпись» и координата i -го компонента). При этом пространственно-спектральная характеристика будет $S(\tau, \lambda, x) \in \{\lg(\tau_i, \lambda_i, x_i)\}_{i=1}^n$, отображение которой и есть гиперспектральное изображение, регистрируемое как интенсивность излучения $\{U(\tau_i, \lambda_i, x_i)\}_{i=1}^n$, которая адекватна распределению оптической плотности $\{D_i(\tau_i, \lambda_i, x_i)\}_{i=1}^n$, а точность регистрации определяется $\Delta\lambda_i = \max \lambda_i - \min \lambda_i$.

Для идентификации компонентов скважинного флюида (углеводороды – C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 и C_6^+ не химические формулы) необходимо знать их спектральные «подписи» и концентрацию от эталона, тем самым $D_i(\lambda_i)$ определяется соотношением с учётом ограничения числом $N = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \times \Delta\lambda^{-1}$ и компонентов скважинного флюида, характеризующим его качество:

$$\begin{aligned} \{D_i(\tau_i, \lambda_i, x_i)\}_1^n &= \left\{ \frac{C_i}{C_{Ri}} \times U_{Ri}(\tau_{Ri}, \lambda_{Ri}, x_{Ri}) \right\}_1^n \Rightarrow \\ \Rightarrow D(\tau, \lambda, x) &= \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{Ri}} \times S_{Ri}(\tau_{Ri}, \lambda_{Ri}, x_{Ri}). \end{aligned} \quad (3)$$

Для того, чтобы найти концентрацию и идентификацию компонентов скважинного флюида как решение системы линейных уравнений (4) методом Крамера для решения линейных уравнений и в вычислительном устройстве ГВС методом распараллеливания вычислительных процессов:

$$\left\{ C_i = \sum_{j=1}^N [D_j(\tau_i, \lambda_i, x_i) C_{Rj}] \times [S_{Rj}(\tau_{Ri}, \lambda_{Ri}, x_{Ri})]^{-1} \right\}_{i=1}^6. \quad (4)$$

Для идентификации зарегистрированных углеводородов относительно эталонных углеводов необходимо подобрать набор ортогональных функций $g_i(\tau_i, \lambda_i, x_i)$, но достаточно рассматривать только $g_i(\lambda_i)$ при условии, что относительная погрешность $\Delta\lambda_i \times (\Delta\lambda_{Ri})^{-1} \leq 1,15$, тогда уравнение 4 будет эквивалентно следующему:

$$\left\{ C_i = \int_{\lambda_{i,\min}}^{\lambda_{i,\max}} D_i(\lambda_i) \cdot g_j(\lambda_j) d\lambda \right\}_{i=1}^6. \quad (5)$$

$$j \neq i \Rightarrow C_i = 0$$

На рис. 3 представлен алгоритм идентификации и концентрации состава скважинного флюида, где $(\mathcal{E}_r \vee C_i)$ – операция сравнения результата регистрации спектральных «подписей» исследуемого флюида и эталонного его образа (решение уравнения 5).

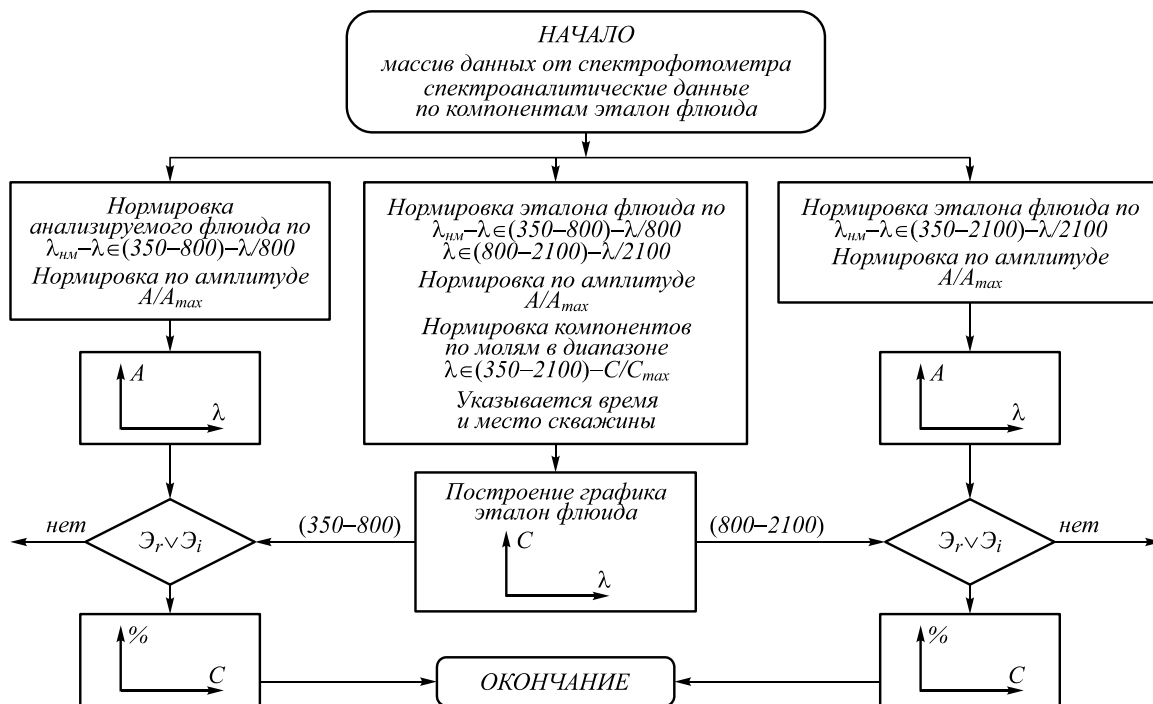


Рис. 3. Алгоритм идентификации состава скважинного флюида

4. Схема спектроанализатора скважинного флюида

При разработке спектроанализатора скважинного флюида (ССФ) учитывался опыт работы фирмы Schlumberger (www.slb.ru). В состав ССФ входят:

- спектрофлуориметр
 $\lambda_{фл} \in 0,38 \div 0,78 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda_{фл} = 4 \text{ нм}$;
- спектрофотометр
 $\lambda_{сф_1} \in 0,38 \div 0,78 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda_{сф_1} = 4 \text{ нм}$;
- спектрофотометр
 $\lambda_{сф_2} \in 0,78 \div 2,1 \text{ мкм} \Rightarrow \Delta\lambda_{сф_2} = 10 \text{ нм}$.

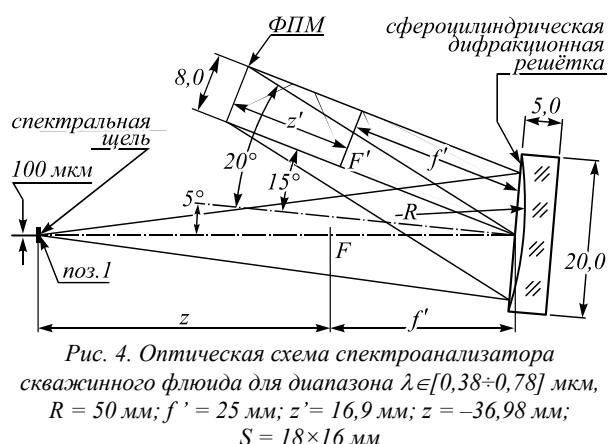
Идентификация по составу скважинного флюида осуществлялась на основе эталонных компонентов (или аттестованные копии) по данным измерений в лаборатории. Относительная погрешность оценки компонентов скважинного флюида по процентному содержанию по сравнению с исследованием в специализированной лаборатории составила 18 %. Погрешность можно уменьшить за счет улучшения технологии прокачки и чистоты флюида, поступающего в

кювету ГВС. На рис. 4 представлена оптическая схема спектрофотометра и спектрофлуориметра для $\lambda \in [0,38 \div 0,78] \text{ мкм}$. Для диапазона $\lambda \in [0,78 \div 2,1] \text{ мкм}$ оптическая схема аналогична, но со своей сфероцилиндрической решёткой. Фотоприёмные матрицы в каждом спектрофотометре и спектрофлуориметре снабжены интерференционными фильтрами в соответствии с рабочими спектральными интервалами.

Построение «гиперкуб» (длина волны, координата, компонент) осуществляется за счет того, что флюид относительно щелей каждого из спектроанализаторов принудительно перемещается, а защитное кварцевое окно выполняет функцию интерферометра (как в работе 20).

Заключение

В результате проведенных исследований были определены математическая модель и алгоритм идентификации компонентов скважинного флюида по составу и процентному содержанию в спектральном диапазоне от 0,35 мкм до 2,1 мкм по результатам анализа гиперспектрального изображения.



Разработанный экспериментальный образец спектроанализатора скважинного флюида в лабораторных условиях эксплуатации подтвердил правильность модели и алгоритма идентификации скважинного флюида по составу, что позволяет начать разработку и изготовление опытного образца отечественного комплекса взамен комплекса фирмы Schlumberger.

Благодарности

Работа выполнена в ЗАО «Институт Телекоммуникаций» в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013 – 2030 годы».

Литература

1. Родинон, А.И. Развитие методов многомерных измерений при оптических исследованиях поверхности / А.И. Родинон, Б.В. Зубков [и др.] // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, Вып. 10. – С. 37-51.
2. Козодеров, В.В. Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности / В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 1. – С. 56-72.
3. Балтер, Б.М. Целевое выделение растительных сообществ по данным авиационной гиперспектральной съемки и многоспектрального сенсора ИСЗ Quickbird / Б.М. Балтер, В.В. Егоров [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 2008. – № 6. – С. 14-42.
4. Козодеров, В.В. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов / В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин [и др.] // Исследования Земли из космоса. – 2009. – № 2. – С. 36-54.
5. Абрамов, Б.А. Космический комплекс оптико-электронного наблюдения «Ресурс-ДК1» / Б.А. Абрамов, Ю.А. Лапутин, В.К. Скирмунт, Л.К. Львова // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 2001. – № 2(29)-3(30). – С. 42-45.
6. Горелов, В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения [Электронный ресурс] / В.А. Горелов,

- Е.Л. Лукашевич, В.А. Стрельцов. – URL: <http://www.gisa.ru/5062.html> (дата обращения 16.05.2020).
7. Шилин, Б.В. Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга / Б.В. Шилин, В.Н. Груздев, А.В. Марков, В.Ф. Мочалов // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 12. – С. 41-49.
8. Основы испытания пластов / под ред. А.Г. Загуренко. – пер. с англ. – М.-Ижевск: издательство «ИКИ», 2012. – 432 с.
9. Нанопотоника и её применение в системах ДЗЗ / под ред. В.А. Соифера. – Самара: Новая техника. 2016. – 384 с.
10. Виноградов, А.Н. Линейка гиперспектральных сенсоров оптического диапазона / А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, Е.М. Мельникова, А.И. Родионов, И.Д. Родионов. – М.: ИКИ РАН, 2015.
11. Свиридов, К.Н. Технология достижения высокого углового разрешения оптики атмосферного видения / К.Н. Свиридов. – М.: Знание, 2005.
12. Авдеев, С.П. Анализ и синтез оптико-электронных приборов / С.П. Авдеев. – СПб: Типография "Правда", 2000. – 680 с.
13. Обзор программ и библиотек для работы с гиперспектральными данными [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spectraltechnology.ru/info/articles/obzor-programm-i-bibliotek-dlya-raboty-s-giperspektralnymi-dannymi/> (дата обращения 25.05.2020).
14. ENVI. Области применения [Электронный ресурс]. – URL: www.envisoft.ru/use_regions.html (дата обращения 25.09.2020).
15. Методы компьютерной обработки изображений / М.В. Гашников, Н.И. Глумов, Н.Ю. Ильасова, В.В. Мясников, С.Б. Попов, В.В. Сергеев, В.А. Соифер, А.Г. Храмов, А.В. Чернов, В.М. Чернов, М.А. Чичёва, В.А. Фурсов, под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с. – ISBN: 5-9221-0270-2.
16. Обработка гиперспектральных изображений в программном комплексе ENVI [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sovzond.ru/dzz> (дата обращения 04.06.2020).
17. Дифракционная нанопотоника / А.В. Гаврилов, Д.Л. Головашкин, Л.Л. Досколович, П.Н. Дьяченко, А.А. Ковалёв, В.В. Котляр, А.Г. Налимов, Д.В. Нестеренко, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер, С.Н. Хонина, Я.О. Шуюпова, под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2011. – 680 с. – ISBN: 978-5-9221-1237-6.
18. Абросимов, А.В. Обработка гиперспектральных изображений в ПК ENVI / А.В. Абросимов, А.С. Черепанов // Геопрофи. – 2007. – № 2. – С. 55-57.
19. Козодеров, В.В. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов / В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин [и др.] // Исследования Земли из космоса. – 2009. – № 2. – С. 36-54.
20. Горбунов, Г.Г. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли / Г.Г. Горбунов, А.В. Демин, В.О. Никифоров, А.М. Савицкий, Ю.С. Скворцов, М.Н. Сокольский, В.П. Трегуб // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 75-82.

Сведения об авторах

Демин Анатолий Владимирович – начальник бюро перспективных разработок АО «ЛМО», доктор технических наук, профессор Университета ИТМО. E-mail: dav_60@mail.ru.

Сечак Евгений Николаевич – начальник лаборатории оптических систем, АО «ЛОМО», аспирант Университета ИТМО. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, адаптивная оптика, обработка изображений. E-mail: evgenysechak@gmail.com.

Присяжнюк Сергей Прокофьевич – генеральный директор ЗАО «Институт Телекоммуникаций», доктор технических наук, профессор Университета ИТМО. E-mail: spprisyazhnyuk@itmo.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 4 февраля 2020 г. Окончательный вариант – 30 декабря 2020 г.

Determining the composition of an object based on its hyperspectral image

A.V. Demin^{1,2}, E.N. Sechak^{1,2}, S.P. Prisyazhnyuk^{1,3}

¹ ITMO University, 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverkskiy prospekt, 49,

² JSC "LOMO", 194044, Russia, St. Petersburg, Chugunnaya 20,

³ CJSC "«Institute of Telecommunications»", 194100, Russia, St. Petersburg, Kantemirovskaya 5

Abstract

The article presents results of the development and research of a hyperspectral imaging spectrometer for analyzing borehole fluids in real operating conditions in the spectral range from 0.35 microns to 2.1 microns. A mathematical model and an algorithm for identifying the borehole fluid by composition and percentage content based on the results of hyperspectral image analysis are developed.

Keywords: computer optics, image processing, image analysis, three-dimensional image processing, spectrometer.

Citation: Demin AV, Sechak EN, Prisyazhnyuk SP. Determining the composition of an object based on its hyperspectral image. *Computer Optics* 2021; 45(3): 394-398. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-697.

Acknowledgements: The work was carried out at the JSC "Institute of Telecommunications" within the framework of the State Program of the Russian Federation "Development of shipbuilding and technology for the development of offshore fields in 2013-2030".

References

- [1] Rodionov AI, Zubkov BV, et al. Development of multidimensional measurement methods in optical surface studies [In Russian]. *Journal of Technical Physics* 2002; 72(10): 37-51.
 - [2] Kozoderov VV, Kondranin TV, et al. Innovative technology for processing multispectral space images of the Earth's surface [In Russian]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2008; 1: 56-72.
 - [3] Balter BM, Egorov V.V. et al. Targeted isolation of plant communities according to the data of aerial hyperspectral imaging and the multispectral sensor of the satellite Quickbird. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2008; 6: 14-42.
 - [4] Kozoderov VV, Kondranin TV, et al. Processing and interpretation of hyperspectral aerospace measurements for remote diagnostics of natural-technogenic objects. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2009; 2: 36-54.
 - [5] Abramov BA, Laputin YuA, Skrimunt VK, Lvova LK. The space complex of optical-electronic surveillance "Resource-DK1" [In Russian]. *Newsletter of the GIS Association* 2001; 2(29)-3(30): 42-45.
 - [6] Gorelov VA, Lukashevich EL, Streltsov VA. Status and development trends of high-resolution space remote sensing spacecraft [In Russian]. Source: <http://www.gisa.ru/5062.html>.
 - [7] Shilin BV, Gruzdev BH, Markov AB, Mochalov VF. Use of video spectral aerial photography for environmental monitoring [In Russian]. *Opticheskii Journal* 2001; 68(12): 41-49.
 - [8] Fundamentals of formation testing. Sugar Land, Texas: Schlumberger; 2006.
 - [9] Soifer, VA. ed. Nanophotonics and its application in remote sensing systems [In Russian]. Samara: "Novaya Tekhnika" Publisher; 2016.
 - [10] Vinogradov AN, Egorov VV, Kalinin AP, Melnikova EM, Rodionov AI, Rodionov ID. The set of hyperspectral sensors in the optical band [In Russian]. Moscow: "IKI RAN" Publisher; 2015.
 - [11] Sviridov KN. Technology for achieving high angular resolution of atmospheric vision optics [In Russian]. Moscow: "Znanie" Publisher; 2005.
 - [12] Avdeev SP. Analysis and synthesis of optoelectronic devices [In Russian]. Saint-Petersburg: "Tipografiya Pravda" Publisher; 2000.
 - [13] Overview of programs and libraries for working with hyperspectral data. Source: <https://www.spectraltechnology.ru/info/articles/obzor-programm-i-bibliotek-dlya-raboty-s-giperspektralnymi-dannymi/>.
 - [14] ENVI. Fields of application. Source: https://www.envisoft.ru/use_regions.html.
 - [15] Soifer VA, ed. Methods for computer design of diffractive optical elements. New York: John Wiley and Sons Inc; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
 - [16] Hyperspectral image processing in the ENVI software package. Source: <http://www.sovzond.ru/dzz>.
 - [17] Soifer VA, ed. Diffraction nanophotonics [In Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2011. ISBN: 978-5-9221-1237-6.
 - [18] Abrosimov AV, Cherepanov AS. Hyperspectral image processing in ENVI PC [In Russian]. *Geoprofi* 2007; 2: 55-57.
 - [19] Kozoderov VV, Kondranin TV, et al. Processing and interpretation of hyperspectral aerospace measurements for remote diagnostics of natural-technogenic objects [In Russian]. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa* 2009; 2: 36-54.
 - [20] Gorbunov GG, Demin AV, Nikiforov VO, Savitskiĭ AM, Skvortsov YS, Sokol'skii MN, Tregub VP. Hyperspectral apparatus for remote probing of the Earth. *J Opt Technol* 2009; 76(10): 651-656.
-

Authors' information

A.V. Demin – Head of Advanced Development Bureau of JSC «LOMO», Doctor of Science, Professor of ITMO University. E-mail: dav_60@mail.ru.

E.N. Sechak – head of the optical systems laboratory, JSC «LOMO», post-graduate of ITMO University. Research interests: remote sensing of the earth, adaptive optics, image processing. E-mail: evgenysechak@gmail.com.

S.P. Prisyazhnyuk – General Director of CJSC «Institute of Telecommunications», Doctor of Science, Professor of ITMO University. E-mail: spprisyazhnyuk@itmo.ru.

Received February 4, 2020. The final version – December 30, 2020.
